

(21) 硫黄酸化物大気環境改善の原因構造
に関する研究

STUDY ON THE AIR QUALITY IMPROVEMENT STRUCTURE IN JAPAN
WITH RESPECT TO SULFUR OXIDES

井村 秀文*
Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Environmental quality in terms of SO_x in the atmosphere has been drastically improved in Japan since 1970s. The emission reduction achieved in the 1970s can be attributed to the strict regulation enforced by the central and local governments. The reduction in the 1980s, however, was realized under an economic and energy condition very different from that in the 1970s. While the Japanese economy underwent drastic structural changes in favor of energy saving, a pollution charge system was inaugurated in 1974 based on the Pollution-Victims Compensation Law, and the ever increasing rate of charges imposed on emission sources created an economic incentives to reduce emission levels beyond the regulatory standards. The incentive effect was particularly significant in the regions designated by the law, as is discussed in this paper. An economic model is presented to estimate the emission reduction owing to the decreasing demand of heavy oil and the increasing rate of charges. Basic mechanisms of the emission reduction achieved in the 1980s are explained by this model for the whole designated regions and for some selected cities.

KEY WORDS; air pollution, sulfur oxides, emission charges, economic incentives, energy and environment

1. はじめに

昭和40年代後半以降におけるわが国の大気汚染状況の推移をみると、硫黄酸化物について著しい改善が達成されている。これは、昭和50年代初めまでは、国及び地方自治体による厳しい規制によるところが大であったが、昭和50年代半ば以降については、産業構造の変化、鉱工業部門におけるめざましい省エネルギー努力、電力部門における原子力・LNG等への転換など、経済・エネルギーの構造的変化による面が大である。また、昭和49年に公害健康被害補償法が施行され、硫黄酸化物を排出する全国の事業所から、汚染負荷量賦課金が徴収されることとなり、これが汚染排出量削減の経済的インセンティブとして一定の効果を発揮したものと考えられる。

現在、わが国における大気汚染の関心の中心は、窒素酸化物、浮遊粒子状物質等に移っているが、世界的に見れば、欧州・北米地域において酸性雨が大きな国際問題になっているなど、硫黄酸化物対策がなお中心的課題である。また、わが国における硫黄酸化物排出量とエネルギー使用量、汚染賦課金等の関係を分析す

* 九州大学工学部環境システム工学研究センター Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, University of Kyushu

るために必要なデータが不十分ながらも利用可能になったのは最近のことであり、その解析は今後の課題である。特に、汚染賦課金が汚染物質の排出量低減に如何なる効果を果たすかは、環境経済学の基本的テーマとして古くから議論がなされてきた問題であるが、実証的データに基づく報告例はあまり見られない〔1、2、3〕。これは、汚染賦課金が制度として実際に導入された例が、特に大気汚染については、国際的にも少ないからであり、わが国の事例は、またとない実証的研究の材料を提供してくれるものである。

本論文においては、このような観点から、最近利用可能になったデータに基づき、わが国における硫黄酸化物排出量低減をもたらした原因構造について、燃料転換と汚染賦課金の関係を中心に分析する。

2. 硫黄酸化物排出量の推移

2. 1 汚染排出量の推移

わが国における大気中硫黄酸化物の排出量は昭和45年頃にピークを記録したが、その後、国及び地方自治体による厳しい規制の効果により大幅に削減された。特に、昭和40年代末から53年にかけては、環境基準の達成を目指して、総量規制の導入をはじめ、精力的に排出量削減対策が実施された。

全国における硫黄酸化物(SO_x)総発生量のデータとして、昭和48年以降は、公害健康被害補償法(公健法)施行のための排出量調査の結果がある。これは、排ガス量が、公健法の指定地域(大気汚染に係る第一種地域)については $5,000\text{N m}^3/\text{日}$ 以上、その他の地域については $10,000\text{N m}^3/\text{日}$ 以上の、比較的大規模な発生源だけを対象にするものであるが、實際上これによって全国の総排出量の9割以上が把握されているものと試算される。このデータに基づき、指定地域とその他の地域の各々の SO_x 排出量の推移をプロットしたのが図1である〔4〕。この図

に示すとおり、全期間を通じ、指定地域の方が、その他地域に比べ、年々の排出量減少率は約1.8倍大きい。また、両地域ともに、昭和53年を境に、それ以前と以後で、排出量の減少率に明確な差が見られ、以後の値は以前の値の半分以下である。

指定地域には、四大工業地帯を代表とする全国の主要な重化学工業地帯が含まれ、三大都市圏をはじめとする人口集中地域とも重なることから、他地域以上に厳しい規制が実施された。この結果、昭和53年まで、年率36%の急速な排出量削減が達成され、その後も年率17%の削減が続いている。このため、昭和50年代半ばにおいては、環境濃度で見て、指定地域とその他の地域の差は殆ど見られなくなっている。それにもかかわらず、指定地域においてその他地域の2倍近くの年率で排出量削減が持続してきた原因としては、一般に、指定地域では、行政及び市民の双方に環境改善を求める要求が強く、企業の新規立地にあたっては、公害防止協定などにより、使用燃料の質・量について、厳しい規制・指導が適用され、その一方で旧来の汚染発生施設の設備更新が進み、また、中小発生源の対策も強化されたことがあげられる。さらに、もう1つの大きな要因として、昭和49年から徴収されるようになった汚染負荷量賦課金の料率が急激に上昇し、これが排出量削減の経済的インセンティブとして効果を発揮したものと考えられる。

賦課料率(SO_x 排出量 1N m^3 当たりの賦課金額)は、公害健康被害認定患者数の増大とともに補償費が膨張し、その一方で汚染排出量が低減したことから、年々急激な上昇を見ることになった。特に、指定地域

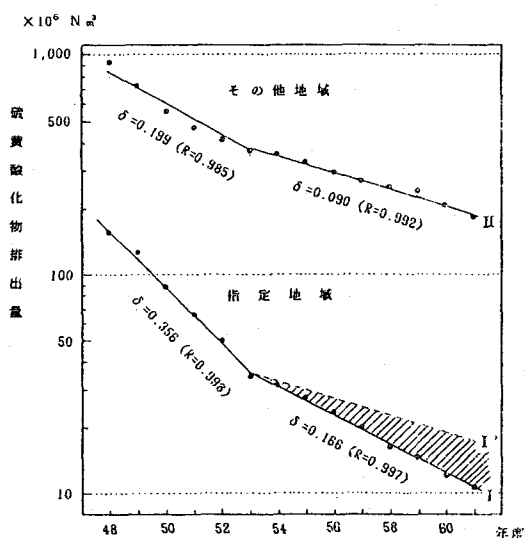


図1 指定地域及びその他地域における硫黄酸化物排出量の推移比較(δ: 排出量減少率, R: 相関係数)

の料率は、その他地域より平均9倍程度高く設定されており、82年度には、一番高い大阪地域で 5,363 円、東京で 3,246円、福岡で 2,117円と、10年間で 10~25倍に増大した（制度初期の昭和51年には 210 円に過ぎなかった）。例えば、硫黄含有量 1%（重量）の C 重油を仮定した場合、この料率は、使用量 1kl 当たり 1.2~3.0 万円と、価格の 20~50% にも達することになり、価格は高くとも低硫黄分の A 重油や灯油を使用した方が費用的に安くてすむという事態になっている [4]。

2. 2 燃料選択の構造

わが国の場合、硫黄酸化物の大部分は化石燃料の中の重油の燃焼によるものである。昭和48年以降における鉱工業と電力の両部門における重油使用量と SO_x 排出量の関係を示したのが図2である。この図の通り、昭和48年~54年の期間においては、重油の使用量をそれほど減少させることなく、燃料中の S 分濃度の低下、排煙脱硫装置の導入等の対策によって排出量が削減された。これに対し、昭和55年以降は、重油使用量の減少にほぼ比例して排出量が低減している。これは、昭和50年代後半の SO_x 排出削減は、全国的に見る限り、規制強化とあいまって進行した産業構造の変化、製造業における省エネルギー努力等によって実現した面が強いことを意味している。

わが国で使用される燃料は、公害規制の強化とともに、重油から LNG 等への気体燃料へ、また、液体燃料の中では、C 重油から S 分濃度の少ない A 重油や灯油へと転換されてきている。ここで、新たな設備投資等の転換コストを要しない液体燃料間の転換として、3つのケース、すなわち、①全国の C 重油と A 重油+産業用灯油の需要割合、②電力部門における重油と原油の使用割合、③製造業における C 重油と A 重油+灯油の消費割合についてプロットしたのが図3である（昭和56~60年）。いずれのケースにおいても、液体燃料の使用量が全体的に減少する中で、クリーンな燃料（ここでは、A 重油、灯油及び原油をこの範囲に入れる）の使用量はほとんど変化せず、液体燃料全体の中に占める割合は増大している。

他方、地域的に見れば、大都市等では環境規制が厳しく、その規制の水準によって、使用される燃料の量・質に構造的な差がある。これを見るため、昭和56~60年の5年間に、製造業における液体燃料の使用量と、そこに占める C 重油 (x_1) と A 重油+灯油 (x_2) の割合を地域別に図示したのが図4である。いずれの地域においても、液体燃料の総使用量は減少しているが、A 重油+灯油の占める割合については、それぞれの地域の特徴が現れている。例えば、3大都市圏における A 重油+灯油の使用割合は、名古屋、大阪、東京の順に高くなっているが、これは、各地域の規制水準と環境容量と密接な関連を有する経済活動・人口

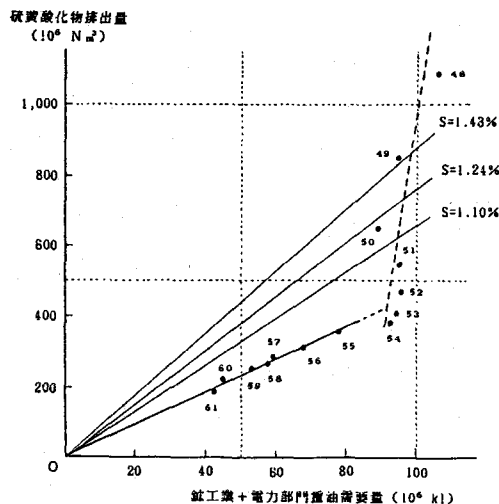


図2 鉱工業及び電力部門における重油需要量と硫黄酸化物排出量の関係。重油中 S 分濃度（上より、昭和49年、56年、61年に相当）と排出量の関係を参考として示す。

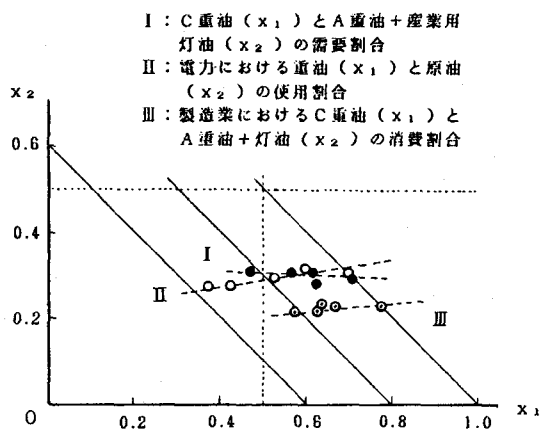


図3 各種液体燃料間の代替（昭和56年度において $x_1 + x_2 = 1$ になるように規格化）

の集中度の順序に一致している。これらの大都市では、賦課料率もとりわけ高く、これがさらに、低硫黄燃料の使用に拍車をかけたものと推測されるが、この点については、後に理論的に考察することにする。

2. 3 汚染負荷量賦課金との関係

昭和50年代後半において実現した硫黄酸化物の環境改善は、全国的に見れば、産業・エネルギー構造の変化という大きな潮流によって実現した面が大であるが、指定地域においては、汚染賦課金の存在がこれに相加的に作用したものと考えられる。

昭和53年以降、指定地域における規制水準、賦課料率、産業構造変化の内容・速度が、その他地域と全く同一であったと仮定すれば、排出量の推移は図1のラインⅠ'（ラインⅡに平行）のようになったはずである。実際に実現したラインⅠとⅠ'の差（図の斜線部分）に、賦課金の効果が反映されていることになる。

もちろん、ⅠとⅠ'の差のすべてを賦課料率の差に起因するとみなすことは出来ないが、その重要な要因であったものと考えられる。ちなみに、昭和60年において、Ⅰ'の値はⅠの約2倍になっている。

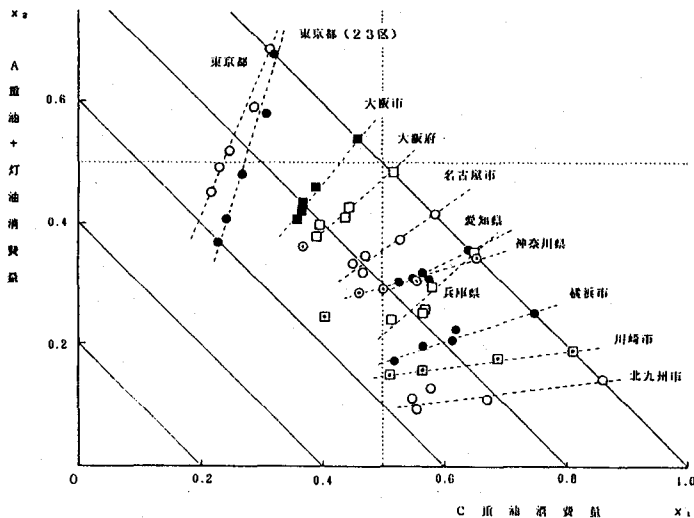


図4 地域別に見た液体燃料間の代替（昭和56～60年度）

3. 理論的説明 —— エネルギー選択と汚染排出量の関係についてのモデル

ここで、指定地域とその他地域の差がどのような経済的メカニズムによって実現したかを考察してみよう。

エネルギー源として、汚染を発生するエネルギー1（E1）と汚染を発生しないエネルギー2（E2；クリーンエネルギー）の2種類を考えることにする。分析の対象としては、ある特定の地域あるいは産業部門を念頭において議論を進める。ある生産期（年）におけるエネルギーの総使用量Eは、その期の生産物需要及び生産計画によって外生的に決定されるが、E1、E2の選択は両者の相対的コストによって決まるものとし、各々の需要量E1、E2がどうなるかを考えてみよう。

一般にE1の価格 α_1 は、E2の価格 α_2 より低い。しかし、E1を使用する場合には、汚染物質の排出規制に対応するため、公害防止装置の建設費・運転費・原材料費・保守管理費等の技術的対策のコスト（処理コストと呼ぶ）がかかる。また、たとえ一定の技術的対策を施したにしても、汚染物質の100%除去が出来ない限り、E1の使用量とともに環境汚染がひどくなり、被害の発生という事態になる。また、たとえ現実に被害が発生しなくとも、被害の可能性に対する住民の懸念が強まり、規制当局との協議、地域住民対策、立地上のさまざまな制約等ともなうコスト（被害費用と呼ぶ）が急増する。このような被害費用を現実的に計測することは難しいが、企業は何らかの意味でその評価を行い、エネルギー選択の戦略を決定していると考えられる（もし、現実に被害を引き起こせば、補償費用はもとより、企業イメージの低下など、その費用は高くつく。）。また、環境の質に対する市民のニーズが高度化するほど、被害費用は増大する。

エネルギーE1の使用にともなう費用を、上記の処理費用 F_1 と被害費用 F_2 の和Fと考え、E1とともにその値がどう変化するかを考えてみよう。

以下、議論の便宜のため、ある期におけるエネルギーの総使用量Eを基準としてエネルギー使用量を表

すことにし、 $x_1 = E_1 / E_0$ 、 $x_2 = E_2 / E_0$ と置く。すると、エネルギー x_1 を使用したときの単位エネルギー当たりの平均費用（価格）は、

$$\alpha_1^* = \alpha_1 + \gamma + f(x_1), \quad f(x_1) = F(x_1) / x_1 E_0 \quad (1)$$

と表される。ここで、 γ は、 E_1 を1単位使用した場合に発生する硫黄酸化物に対する賦課金の額である。

汚染の限界処理費用 F_1' は、技術一定の場合、規模の経済によって逓減する ($F_1'' < 0$)。例えば、排煙脱硫装置によって、現在技術的に可能な除去効率で汚染を処理する場合、限界費用は逓減する。しかし、もし、 E_1 の使用量が増大し、汚染の発生量が多くなれば、規制が厳しくなり、除去効率を大幅に向上させなければならなくなる。この場合には、技術的な制約から、限界費用は逓増するであろう ($F_1'' > 0$)。また、汚染の限界被害費用 (F_2') は、汚染発生量とともに逓増 ($F_2'' > 0$) し、汚染があるレベル、例えば環境基準を超えるレベルに達すれば、その値は急激に大きくなる。限界費用が逓増する場合、 x_1 がある程度大きくなれば ($F' / F > x_1^{-1}$)、平均費用も逓増する ($f' > 0$) (図5)。

こうして、 E_1 の使用量がある量を超すと、汚染の処理費用及び被害費用を含めた燃料価格 α_1^* は逓増する。一般に、 E_2 の価格 α_2 は、 E_1 の価格より高いから、 x_1 の値が小さいうちは、 E_1 を使用する方が費用的に有利であるが、 x_1 の増大とともに、 α_1^* が上昇し、やがて E_2 を使用した方が有利となる。

ところで E_2 の価格については、例えばA重油の場合、原油からの得率には製造技術上の制約があり、製造設備能力にも限界があるため、C重油との価格差は x_2 の増加関数になるであろう。そこで、

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \Delta\alpha + h(x_2) \quad (2)$$

$$h(0) = 0, \quad h'(x_2) > 0$$

と書こう。この時、エネルギー使用の等費用曲線は、

$$c(x_1, x_2) = \alpha_1^* x_1 + \alpha_2 x_2 = \text{一定} \quad (3)$$

で与えられる。経済的に最適な燃料の選択 (x_1, x_2) は、

$$E/E_0 = x_1 + x_2 = \zeta \quad (4)$$

が所与の下で費用を最小にする条件から、エネルギー代替曲線 G :

$$F'(x_1) - H'(x_2) = \Delta\alpha - \gamma \quad (5)$$

$$h(x_2) \equiv H(x_2) / x_2 E_0$$

と式(4)の直線 L の交点で与えられる。ただし、次式を仮定した :

$$d^2 c / dx_1^2 = F''(x_1) + H''(x_2) > 0 \quad (6)$$

以下の議論では、 $F''(x_1) > 0$ の場合を仮定し、 $H(x_2)$ については、式(6)よりさらに強い仮定 $H''(x_2) > 0$ を置く。

さて、エネルギー需要量 ζ 及び賦課料率 γ の変化によって最適点がどう移動するかを見よう。曲線 G の接線の勾配は、式(5)より、

$$dx_2 / dx_1 = F''(x_1) / H''(x_2) > 0$$

となるから、曲線 G は右上がりである。また、式(5)より、

$$\partial x_1 / \partial \gamma = -1 / F''(x_1) < 0$$

となるから、 γ の上昇とともに曲線 G は左方にシフトする。

エネルギー需要量が ζ_1 から ζ_2 に減少 ($\Delta\zeta = \zeta_1 - \zeta_2$) し

たとすると、直線 L_1 は L_2 にシフトする。この間に、賦課料率が

$\Delta\gamma$ 上昇したとすれば、曲線 G_1 は G_2 にシフトする。この結果、最適点 P は R に移動し、 E_1 の使用量は、

$$\Delta x_1 = a \Delta\zeta + b \Delta\gamma \quad (7)$$

$$a = F'' / (F'' + H''), \quad b = 1 / (F'' + H'')$$

だけ減少する。係数 a は、エネルギー総需要量が減少したことによる削減効果、係数 b は、賦課料率が上昇したことによる削減効果を表す (SO_x の排出削減量は燃料 E_1 の使用削減量に比例する)。

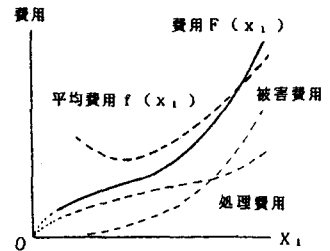


図5 汚染の処理費用・被害費用

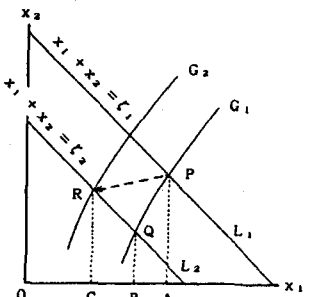


図6 賦課金による汚染削減効果

$$(AB = a \Delta\zeta, BC = b \Delta\gamma)$$

議論を簡単にするため、価格関数として、

$$f(x_1) = \xi \Delta \alpha x_1^r, \quad h(x_2) = \eta \Delta \alpha x_2^s \quad (r > 1, \quad s > 1) \quad (8)$$

を仮定してみよう。この時、式(5)は、次式のように簡単化される：

$$\xi(r+1)x_1^{r-1} - \eta(s+1)x_2^{s-1} = 1 - g \quad (g \equiv \tau / \Delta \alpha) \quad (9)$$

4. モデルの検証及び考察

最近の石油製品価格は、国際石油市場、為替レート等の変動を反映して、大きく高下している。その指標として、昭和56～60年度の輸入製品のCIF単価を見ると、C重油は30～49千円/kl、A重油は40～62千円/klであり、両者の価格差は、6～14千円/klと変動している[5]。仮に、C重油とA重油のS分濃度差を1%、賦課料率を800～3,000円/KN_{m3}とすると、gの値は、0.35～1.3となる。

その他地域及び全国については、 $g=0 \sim 0.1$ であり、賦課金の効果は非常に小さく、モデルの検証のためには、指定地域に着目して調べる必要がある。これには、指定地域内の発生源の燃料使用に関するデータが必要であるが、各種エネルギー統計のほとんどは、都道府県ないしは市の行政単位でしか整備されていない。市域の一部を線引して定められている指定地域のデータを得るためには、自治体の保有する汚染発生源台帳等によって集計する必要がある。このほか、地域ごとの石油製品価格、処理費用・被害費用等のデータも不足しており、モデルの明快な定量的検証はただちには難しい。このため、本論文では、次のような定性的ないしは半定量的な検証を行うことにする。

川崎、横浜、名古屋、北九州では、大規模発生源の地理的分布等から、SO_xの全発生量の1/5～1/2程度は指定地域からと試算される。この場合、市域全体についてのgの値は、この分、指定地域だけの値より小さくなる。また、大阪市は全市域、東京都は23区中の19区が指定地域である。各地域のエネルギー代替曲線の形状は、E1とE2の各々の費用(実質価格)の相対的關係によって決まる。これを、

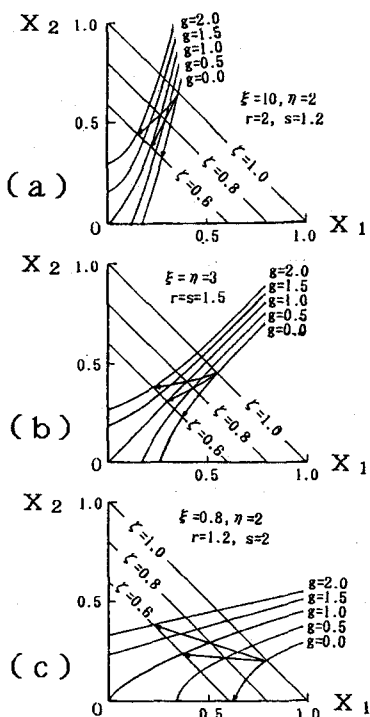
ケース(a)：E1の費用が相対的に大きな場合($\xi > \eta$, $r > s$)……東京

ケース(b)：E1とE2の費用がほぼ等しい場合($\xi \sim \eta$, $r \sim s$)……大阪、名古屋

ケース(c)：E2の費用が相対的に大きな場合($\xi < \eta$, $r < s$)……横浜、川崎、北九州

の3つのタイプに分けて、式(9)に基づき、図5の各地域の特性を再現するようにパラメータの値を設定した結果を図7に示す。これにより、絶対値の議論を除けば、液体燃料の使用量全体の減少と賦課料率の上昇がどのように作用しあって汚染発生量の減少をもたらしたかについての基本的メカニズムと特性が説明できる。

また、本モデルは、大気汚染のみならず、水質汚濁の場合も含め、より一般的に、汚染発生技術からクリーンテクノロジーへの転換に対する汚染賦課金(料金)の効果を議論する場合に適用できであろう。



(注) gの値が1.0→0.8→0.6と減少する時、gの値として、(1) $g=0$ で不変、(2) $g=0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1.0$ と増加、(3) $g=0 \rightarrow 1.0 \rightarrow 2.0$ と増加の3ケースを考え、各々の場合における最適点の移動を図中矢印で示す。

図7 燃料選択と賦課料率の関係

- 《参考文献》[1] OECD: "Pollution Charges" (Paris 1976)、[2] OECD: The Polluter Pays Principle (Paris 1975)、[3] Rémy Prud'homme: "Le Menagement de la Nature des Politique contre la pollution (Brodas, Paris, 1980) (邦訳: レミ・ブリュドム「自然と人間の共存」(千曲秀版社))、[4] 「改正公健法ハンドブック」(エネルギー・ジャーナル社)、[5] 総合エネルギー統計(資源エネルギー庁)、石油等消費構造統計表/エネルギー消費構造統計表(通産省)、内外石油資料(石油連盟)